PANAMGEO CHILE 2024
17th PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING | 2nd LATIN-AMERICAN REGIONAL CONFERENCE OF IAEG
LA SERENA • CHILE / NOVEMBER 12 - 16, 2024

Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.

Reduction of uncertainty in the geotechnical diagnosis of railway tracks by data fusion

Reducción de la incertidumbre en el diagnóstico geotécnico de vías férreas mediante fusión de datos

Jorge Rojas & Pierre Breul & Aurélie Talon
Civil Engineering Department, University of Clermont Auvergne, Institut Pascal, Aubière Cedex, France, jrojas@sol-solution.com

Sébastien Barbier & Miguel Benz Navarrete & Fabien Ranvier
Sol-Solution, Riom Cedex, France

Miguel Saavedra & César Valenzuela & José Luis Arraño & Johnny Luna.
EFE Valparaíso, Valparaíso, Chile

ABSTRACT: The degradation of the substructure plays a crucial role in the geometric deterioration of railway track. The condition of the substructure is evaluated by means of geotechnical diagnostics that consider various parameters, among which the geotechnical layer model stands out (Basye et al., 2020). The accuracy in the determination of this model is essential, since it significantly influences decision making and ensures the efficiency of the measures taken. In this study, data fusion is proposed to reduce the uncertainty and increase the reliability of the geotechnical layer model of the substructure. This technique combines different types of data and monitoring results, integrating geotechnical indicators (Pandoscope®) and volumetric geophysical measurements (Ground penetration radar - GPR). The results show that data fusion increases the accuracy of the geotechnical model, improving decision making in railway maintenance.

RESUMEN: La degradación de la subestructura juega un papel crucial en la deterioración geométrica de las vías. El estado de la subestructura se evalúa mediante diagnósticos geotécnicos que consideran diversos parámetros, entre los cuales destaca el modelo de capas geotécnicas (Basye et al., 2020). La precisión en la determinación de este modelo es esencial, dado que influye significativamente en la toma de decisiones y asegura la eficiencia de las medidas adoptadas. En este estudio, se propone la fusión de datos para reducir la incertidumbre y aumentar la fiabilidad del modelo de capas geotécnicas de la subestructura. Esta técnica combina diferentes tipos de datos y resultados de monitorización, integrando indicadores geotécnicos (Pandoscope®) y medidas geofísicas volumétricas (Geo-radar - GPR). Los resultados muestran que la fusión de datos incrementa la precisión del modelo geotécnico, mejorando la toma de decisiones en el mantenimiento ferroviario.

KEYWORDS: Uncertainty, reliability of results, diagnosis, data fusion.

1 INTRODUCCIÓN

Las capas de material granular que constituyen la base de la infraestructura ferroviaria, con una configuración estándar de balasto, subbalasto y plataforma, desempeñan un rol fundamental en la estabilidad mecánica de esta última. Ellas permiten obtener una adecuada capacidad de soporte que garantice la seguridad de la circulación. Sin embargo, cuando los espesores y la naturaleza de estas capas no son los adecuados, diferentes problemas pueden surgir, los cuales afectan al funcionamiento ferroviario. Como consecuencia, los pasajeros experimentan una pérdida de confort, se reduce la velocidad de los trenes, aumentan los costes de mantenimiento y, en el peor de los casos, se producen accidentes, que pueden ir de leves a graves descarrilamientos.

De esta forma, el control continuo y preciso de los espesores es esencial para garantizar de una parte la seguridad y por otra parte la eficiencia de la explotación ferroviaria. Para ello, cada administrador ferroviario emplea diversos métodos de control para supervisar los espesores y evaluar el estado de las distintas capas. Cada fuente de información alimenta una base de datos para construir un modelo geotécnico a lo largo de la vía.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, esta evaluación contiene un nivel de incertidumbre correspondiente al grado de precisión de la medición utilizada. La gestión de esta incertidumbre es un factor importante para tomar decisiones sobre la explotación y el mantenimiento de las vías férreas.

En el presente trabajo, se propone una metodología para la fusión de datos que permita obtener indicadores más precisos y que estén relacionados con las características geotécnicas de la vía.

2 MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN FERROVIARIA

El monitoreo de la vía férrea constituye la fuente principal de información para los procesos de toma de decisiones. En el contexto de la caracterización geotécnica de la subestructura ferroviaria, se disponen actualmente de diversos métodos y técnicas de medición, tales como la realización de calicatas, la evaluación de la resistencia a la penetración mediante un penetrómetro y el uso de placas dinámicas, entre otros (Brough et al., 2003; Li et al., 2016).

Independiente de las técnicas de medición empleadas, los estudios geotécnicos deben proporcionar la información necesaria para: (i) la identificación de capas, (ii) la caracterización física

(como la humedad, densidad, contaminación, espesores, entre otros) y (iii) el análisis de las propiedades mecánicas relacionadas con la capacidad de soporte de la subestructura.

En el presente estudio, se utilizarán las informaciones proporcionadas por el radar de penetración geológico o geo-radar (GPR), así como el Ensayo de penetración dinámica de energía variable "Panda®", en conjunto con la geoendoscopia, ahora referida como Pandoscope®.

2.1 *GPR*

El GPR, conocido como geo-radar, es un método no destructivo de auscultación geofísica basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en el suelo. Durante la medición, se registran las reflexiones que se producen en profundidad en la interfaz de cada capa (Wang et al., 2022). de esta forma, grandes reflexiones indican cambios en las propiedades electromagnéticas asociadas a distintos materiales o estados de humedad. El GPR se utiliza en diversas aplicaciones ferroviarias, como la determinación del espesor de las capas, la estimación de la suciedad del balasto, la evaluación de la humedad, la detección de objetos (Artagan et al., 2020). En el contexto ferroviario, en la figura 1 se muestra la instalación de tres antenas de 400 MHz para la medición continua de distintos puntos de la vía (riel externo e interno, y eje de la vía).

Figura 1. Instalación de antenas GPR en máquina registradora MRV.

En la Figura 2, se presenta el resultado bruto obtenido (Radargrama) así como el proceso de tratamiento aplicado con el fin de identificar las interfaces de distintos materiales que componen la subestructura (Fig. 2c). Las mediciones se expresan en función de la longitud (abscisas) y el tiempo de propagación (ordenadas), este último en "nanosegundos" (ns).

Para obtener información en unidades de longitud (m), se debe realizar una transformación, la cual se realiza aplicando la siguiente ecuación:

$$e = 0.15 * \frac{t}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

"e" representa el espesor en metros (m), "t" es el tiempo en nanosegundos (ns) obtenido a partir del análisis de la figura 2c, y "ε" corresponde a la constante dieléctrica específica de cada material. (Borkovcová et al., 2021) presenta diversos valores de constante dieléctrica para la capa de balasto bajo diferentes estados de ensuciamiento y de contenido de humedad.

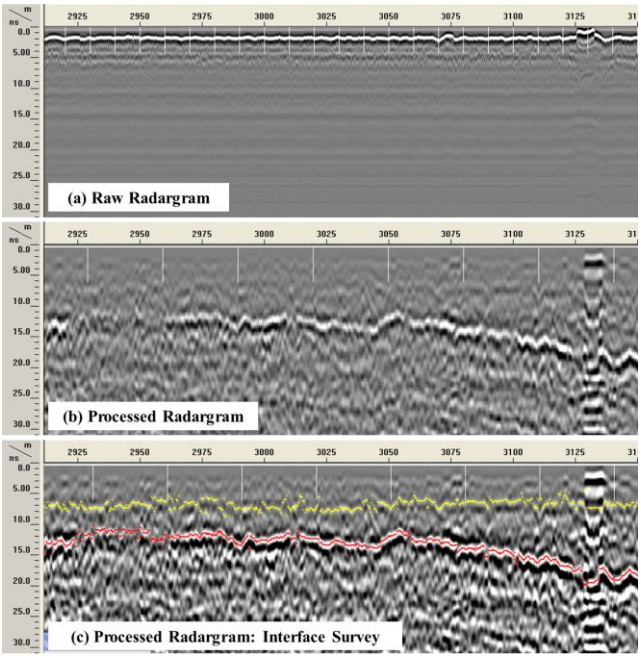

Figura 2. Procesamiento de la información Radargrama

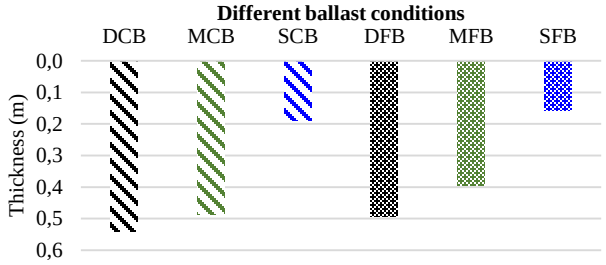

Figura 3. Efecto de la constante dieléctrica para diferentes condiciones de la capa de balasto (Balasto seco limpio (DCB) ε=3,24, Balasto húmedo limpio (MCB) ε=4.03, Balasto limpio saturado (SCB) ε=26,27, Balasto seco contaminado (DCB) ε=3,91, Balasto húmedo contaminado (MCB) ε=6,04 y Balasto saturado contaminado (SCB) ε=38,5).

Al examinar los valores presentados en la figura 3, se puede concluir que una elección inadecuada de la constante dieléctrica, engendrada por el desconocimiento de la naturaleza del material constituyente de cada capa, puede dar lugar a disparidades importantes en las estimaciones de espesor de las capas auscultadas. Aunque ciertas características identificables en los radargramas facilitan a los especialistas la estimación de la humedad y la contaminación presentes en el balasto, se debe subrayar que la variabilidad espacial de las características geomecánicas de las capas siempre estará presente. Para disminuir esta incertidumbre,

la medición proporcionada por el GPR debe ser completada con perfiles verticales que permitan, en diversos puntos de la vía, asegurar la identificación precisa de las distintas capas, su naturaleza, así como su compacidad y su estado hídrico.

2.2 *Pandoscope®*

El Pandoscope® es un método de control geotécnico puntual poco invasivo que se utiliza para la caracterización física y mecánica de las distintas capas que componen la subestructura ferroviaria.

La metodología Pandoscope® (Figura 3) se divide en dos etapas fundamentales: (i) se realiza una prueba de penetración mediante el penetrómetro a energía variable Panda® (Gourvès and Barjot, 1992) y (ii) posteriormente se insertan un geoendoscopio. Estas mediciones son complementarias, ya que el geoendoscopio proporciona información que permite identificar el tipo de material, mientras que el penetrómetro Panda proporciona información sobre el estado de compacidad y la consistencia de capa evaluada (Rojas Vivanco et al., 2024, 2021).

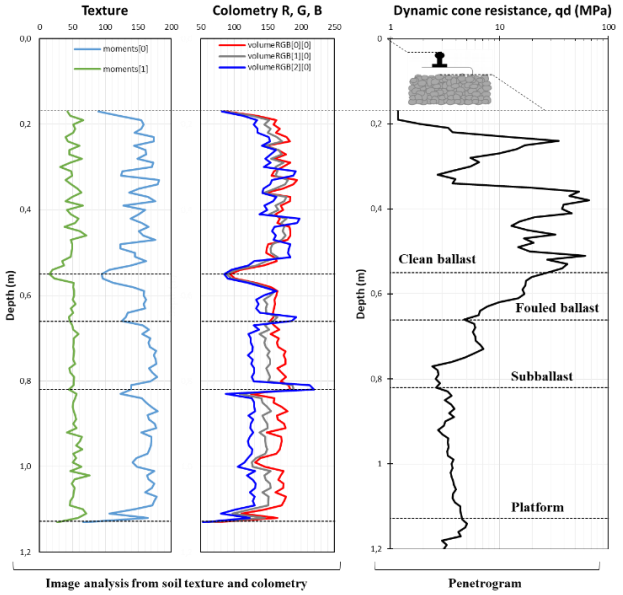

Figura 4. Identificación de los espesores de las capas a partir de la textura, la colometria y los penetrogramas.

La estimación de los espesores de las capas en una vía férrea a través de sondeos Pandoscope® se lleva a cabo mediante tres acercamientos interpretativos distintos. Con el fin de identificar el tipo de material, en primer lugar, se realiza un análisis de la textura de las imágenes, para luego, en segundo lugar, se emplea un análisis de la colorimetría. Por último, se realiza la interpretación del penetrógrama, que permite identificar las distintas capas en función de su consistencia.

En la Figura 4, se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos mediante esta técnica, en el cual se identifican las distintas capas y naturaleza del suelo. En general, mediante esta técnica resulta fácil identificar las tres capas de una vía convencional: balasto, subbalasto y plataforma. Además, se proporciona información adicional sobre el estado al cual se encuentra la capa de balasto, ya sea sana o sucia, lo cual es importante al momento de establecer el envejecimiento de la capa.

Figura 5. Procedimiento de la metodología Pandoscope.

3 FUSIÓN DE DATOS

La fusión de datos consiste en combinar información de diversas fuentes para mejorar la toma de decisiones (Viswanathan, 2020). El método de la masa de creencias, propuesto por Dempster y desarrollado posteriormente por Shafer, calcula las probabilidades de sucesos amalgamando información de diversas fuentes, captando el conocimiento más sólido. Su principal ventaja radica en la capacidad para fusionar información variada, gestionar incertidumbres y perspectivas divergentes, así como evaluar posibles conflictos. En el contexto de la caracterización geotécnica, el método asigna valores a subconjuntos del marco de discernimiento, representando distintas hipótesis sobre las capas del terreno. Al combinar estas funciones de masa con alguna regla, se integra información geotécnica y geofísica, mejorando significativamente la fiabilidad del modelo. Esto facilita gestionar la incertidumbre inherente en la evaluación de la subestructura, generando resultados que permiten una evaluación más precisa y robusta de las condiciones geotécnicas en la infraestructura ferroviaria (Dezert et al., 2022).

El proceso de fusión de datos mediante la teoría de la masa de creencias consta de cuatro etapas fundamentales: (i) Establecer el marco de discernimiento, (ii) Asignar valores de masa de creencias a las decisiones dentro de este marco (lo que se conoce como Asignaciones de Creencias Básicas - BBA), (iii) Seleccionar una regla de combinación adecuada, y (iv) Tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos tras la fusión de datos (Liu et al., 2024).

3.1 *Cuadro de discernimiento*

El Marco de Discernimiento Θ, agrupa todas las decisiones posibles, en el caso de nuestro análisis se asocia a las diferentes capas que se pueden encontrar en la vía férrea, de forma que para n decisiones se tiene:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} \quad (2)$$

En la vía férrea, es posible distinguir varias capas geotécnicas, cuya diversidad está directamente vinculada a las condiciones in situ del trazado. Esta variabilidad se atribuye a factores como las características geológicas y climatológicas del entorno. En las vías convencionales, se destacan tres capas principales: el balasto (θ_1), el subbalasto (θ_2) y la plataforma (θ_3). El espacio de las funciones de masa de creencia, denotado 2^Θ, está fijado por todas las disyunciones y por el conflicto existente entre las fuentes de información (denotado $\emptyset$), ya sea:

$$2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4(\theta_1 \cup \theta_2), \theta_5(\theta_1 \cup \theta_3), \theta_6(\theta_2 \cup \theta_3), \theta_7(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3)\} \quad (3)$$

La ecuación 3 se muestra la posibilidad de identificar ocho espacios distintos. Estos comprenden los espacios de certeza total, θ_1, θ_2 y θ_3. Además, se incluyen los espacios de ignorancia parcial, en donde existe la posibilidad de encontrar mezclas entre los espacios principales: $\theta_4(\theta_1 \cup \theta_2)$, $\theta_5(\theta_1 \cup \theta_3)$ y $\theta_6(\theta_2 \cup \theta_3)$. Se introduce también el espacio de ignorancia total, $\theta_7(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3)$, en donde no es posible identificar a cuál espacio pertenece. Por último, se aborda la noción de conflicto ($\emptyset$), que surge cuando dos fuentes de información proporcionan datos totalmente divergentes, como el caso en el que una fuente indica balasto y la segunda fuente indica plataforma.

3.2 Asignaciones de creencias básicas *(BBA)*

La masa de creencia cuantifica cuánto confiamos en las distintas explicaciones o hipótesis asociadas a una fuente de información. En este estudio, se asignará la masa de creencia a partir de una base de datos la cual permitirá determinar la probabilidad de diferentes hipótesis, mejorando así la fiabilidad del análisis y la toma de decisiones informadas.

3.2.1 Caso de las mediciones *GPR*

La asignación de masa de creencia al GPR se basa en una base de datos que comprende actualmente 1.800 sondeos Pandoscope®, durante las cuales se realizaron mediciones GPR. El método para evaluar la precisión de las mediciones GPR se llevó a cabo mediante un análisis comparativo entre las mediciones Pandoscope® y GPR.

En la figura 6 se muestra inicialmente la relación entre el Pandoscope y el GPR para el límite 1 (Balasto (θ_1)/Subbalasto (θ_2)). En el segundo gráfico, se presenta la cuantificación del error de medición, que presenta una distribución normal. Se observa una tendencia similar en el error, tanto por encima como por debajo de los límites (+ y -). En el tercer gráfico, se presenta la acumulación de errores para las distribuciones positiva y negativa, indicando la asignación por encima y por debajo del límite 1, respectivamente. Desde una perspectiva más amplia, esto sugiere que, a medida que nos alejamos del límite identificado, aumenta la masa de creencia asociada al espacio de discernimiento. La suma total de la masa de creencia debe ser siempre igual a 1 para todos los marcos de discernimiento. La asignación de la masa de creencia para los espacios principales (θ_1, θ_2 y θ_3) se deriva directamente de la Figura 4, mientras que la asignación para los espacios secundarios (θ_4 y θ_6) corresponde al complemento de los espacios principales para alcanzar un total de 1. En la Figura 7 se presenta la asignación de masa del límite 2 (Subbalasto (θ_2)/Plataforma (θ_3)), basada en el mismo principio descrito anteriormente.

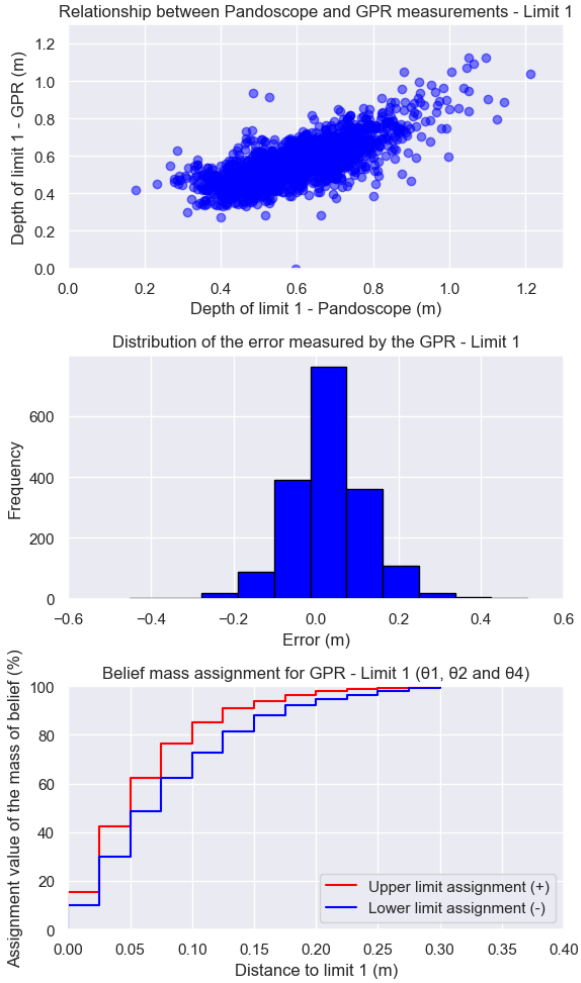
Relationship between Pandoscope and GPR measurements - Limit 1
Depth of limit 1 - GPR (m)
Depth of limit 1 - Pandoscope (m)
Distribution of the error measured by the GPR - Limit 1
Frequency
Error (m)
Belief mass assignment for GPR - Limit 1 (θ1, θ2 and θ4)
Assignment value of the mass of belief (%)
Upper limit assignment (+)
Lower limit assignment (-)
Distance to limit 1 (m)

Figura 6. Reglas para la asignación de la masa de creencia – GPR límite 1.

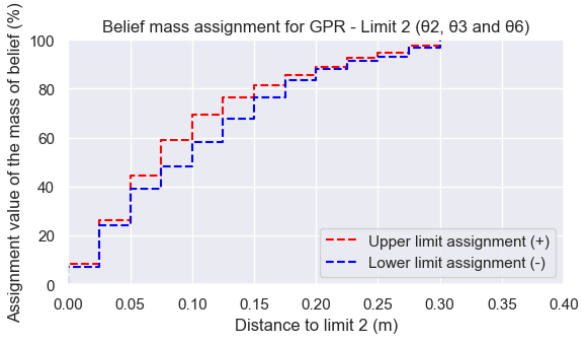
Belief mass assignment for GPR - Limit 2 (θ2, θ3 and θ6)
Assignment value of the mass of belief (%)
Upper limit assignment (+)
Lower limit assignment (-)
Distance to limit 2 (m)

Figura 7. Reglas para la asignación de la masa de creencia – GPR límite 2.

3.2.2 Caso de las mediciones *Pandoscope®*

En términos de asignación de masa de creencia, la información proporcionada por la técnica Pandoscope® se caracteriza por su alta certitud. Sin embargo, al ser mediciones puntuales, a lo largo de la vía no se dispone de información medida directamente entre sondeos. De manera general, en estos casos, se realiza una interpolación lineal para estimar el espesor de la capa.

Como señalan (Dezert et al., 2019), para fusionar las asignaciones de masa de creencia, es esencial disponer de una malla común que contenga las asignaciones de creencia geofísicas y geotécnicas. Dado que los resultados obtenidos mediante GPR proporcionan mediciones de la interfaz de las capas en intervalos de un metro, la interpolación del Pandoscope® generará valores para cada metro. La asignación de la masa de creencia para la interpolación lineal del Pandoscope® se basa en un conjunto de 210.000 puntos interpolados, para los cuales se dispone de mediciones GPR. Estas últimas se considerarán como mediciones totalmente representativas de la subestructura, aunque posteriormente deberán corregirse debido a que las mediciones GPR no son completamente representativas de la subestructura (ver punto 3.2.1)

El método empleado para determinar la asignación de masa de creencia sigue el mismo procedimiento que se utiliza para el GPR. En la Figura 8, se presenta inicialmente una comparación entre las mediciones obtenidas mediante el GPR y las derivadas de la interpolación lineal para el primer límite de capas (balasto/subbalasto). A continuación, se procede a cuantificar el error entre ambos conjuntos de valores, revelando una distribución normal. Este patrón sugiere que la asignación de la masa de creencia se mantiene consistente tanto en la parte superior como en la inferior del límite. Finalmente, se determinan las reglas de asignación de la masa de creencia para la interpolación lineal del Pandoscope®. Estos resultados ya han sido corregidos, ya que el GPR no proporciona mediciones con certeza total. En otras palabras, la masa originalmente calculada fue ajustada multiplicándola por la masa de creencia del GPR, como se ilustra en la Figura 6. Los resultados correspondientes al límite 2 se presentan en la Figura 9 y se encuentran corregidos por los resultados de la figura 7.

3.3 *Reglas de combinación*

En el presente trabajo, se aplicarán tres reglas de combinación con el objetivo de identificar el método que mejor se adapte, teniendo en cuenta la gestión del conflicto y el proceso de normalización.

3.3.1 *Smets (Ss)*

La hipótesis del mundo abierto de Smets (Ss) (Martin, 2005), permite asignar masa de creencias al conflicto fuera del marco de discernimiento. Esto implica:

$$m_{12}(\emptyset) > 0 \tag{4}$$

En la ecuación 4, m_{12} se define como la masa fusionada de las fuentes de información 1 y 2. La ecuación 5 permite determinar el nivel de conflicto, en donde $m_1(X_1)$ y $m_2(X_2)$ son las masas de creencia atribuidas respectivamente a las decisiones diferentes u opuestas. La ecuación 6 permite calcular la masa de creencia para el espacio de X.

$$m_{12}(\emptyset) = \sum_{X1,X2\subseteq\Theta|X_1\cap X_2=\emptyset} m_1(X_1)m_2(X_2) \tag{5}$$

$$m_{12}^{Ss}(X) = \sum_{X1,X2\subseteq\Theta|X_1\cap X_2=\emptyset} m_1(X_1)m_2(X_2) \tag{6}$$

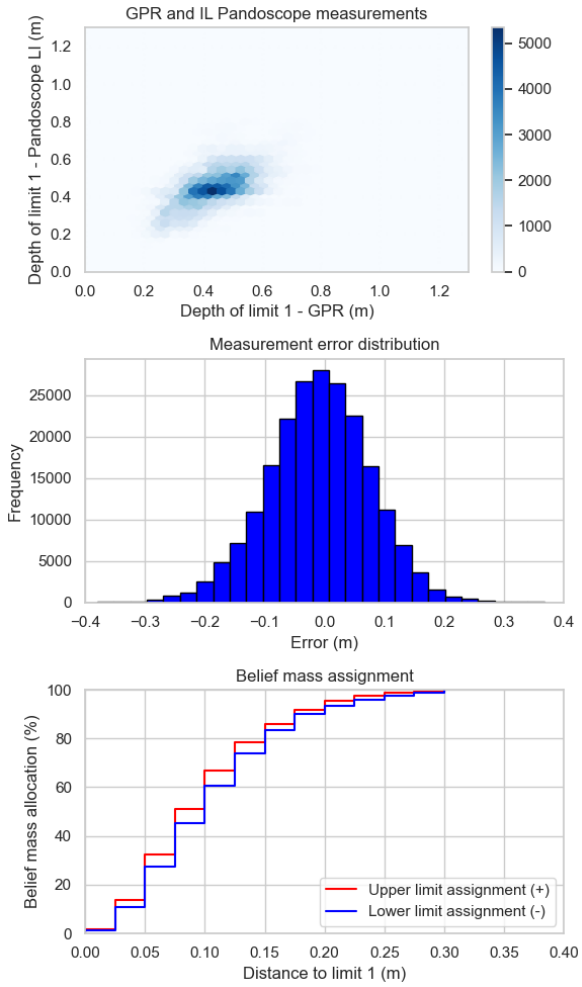
GPR and IL Pandoscope measurements
Depth of limit 1 - Pandoscope LI (m)
Depth of limit 1 - GPR (m)
Measurement error distribution
Frequency
Error (m)
Belief mass assignment
Belief mass allocation (%)
Upper limit assignment (+)
Lower limit assignment (-)
Distance to limit 1 (m)

Figura 8. Reglas para la asignación de la masa de creencia – Interpolación lineal límite 1.

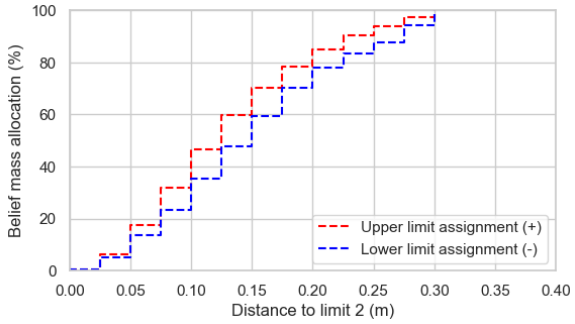

Figura 9. Reglas para la asignación de la masa de creencia – Interpolación lineal límite 2.

3.3.2 *Dempster-Shafer (DS)*

El método de combinación Dempster-Shafer (DS) (Shafer, 2016),

a diferencia de la regla de Smets, se caracteriza por no asignar una masa de creencias al conflicto, es decir, sigue una lógica de "mundo cerrado". En este método, el conflicto se utiliza para normalizar los resultados de la fusión de datos, que pertenecen al marco del discernimiento. La masa de creencia en X, representada como $m_{12}^{DS}(X)$ y resultante de la fusión de la información de las fuentes 1 y 2, se expresa de la siguiente manera:

$$m_{12}^{DS}(X) = \frac{1}{1-m_{12}(\emptyset)} \sum_{X1,X2 \subseteq \theta | X_1 \cap X_2 = \emptyset} m_1(X_1) m_2(X_2) \qquad (7)$$

3.3.3 Redistribución proporcional del conflicto N°6 (PCR6)

El método Dempster-Shafer (DS) puede enfrentarse a importantes retos cuando las fuentes de información muestran un alto grado de conflicto. Una alternativa para abordar estos niveles de conflicto es el método PCR6, que se destaca por su capacidad para gestionar eficazmente tales conflictos. El cálculo de la fusión de datos mediante PCR6 (Smarandache and Dezert, 2016) se realiza de la siguiente manera:

$$m_{1,2}^{PCR6}(X_1) = m_{12}(X_1) + \sum_{X_2 \in 2^\theta} {}_{X_1 \cap X_2 = \emptyset} \left[\frac{m_1(X_1)^2 m_2(X_2)}{m_1(X_1)+m_2(X_2)} + \frac{m_2(X_1)^2 m_1(X_2)}{m_2(X_1)+m_1(X_2)} \right] \qquad (8)$$

3.3.4 Ejemplo comparativo de reglas de combinación

A continuación, se presentan dos ejemplos de la aplicación de las diferentes reglas de combinación para identificar sus principales ventajas y desventajas.

Caso 1: Considerando dos fuentes de información (S1, S2) con un marco de discernimiento limitado a $\Theta = \{A, B\}$. El conjunto de potencia se expresa de la siguiente manera: $2^\Theta = \{\emptyset, A, B, A \cup B\}$. Cada fuente de información (S1 y S2) evalúa el grado de creencia para cada uno de los espacios, estos valores se encuentran en la tabla 1, específicamente en la columna S1 y S2 respectivamente. La interpretación de la masa de creencia implica que cuanto más cercano a 1 sea el valor, mayor será la certeza, mientras que cuanto más cercano a 0 sea, mayor será la incertidumbre.

La fuente de información S1 tiene un mayor grado de creencia para el espacio θ_1 ($m_1(\theta_1) = 0.55$), posteriormente los otros espacios ($m_1(\theta_2) = 0.25$), y ($m_1(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.20$). La fuente de información S2 tiene asignada el mayor grado de creencia a un espacio de ignorancia ($m_2(\theta_1 \cup \theta_2) = 0.70$), el resto de la asignación se reparte de manera uniforme $m_1(\theta_1) = m_1(\theta_2) = 0.15$.

Los resultados de la fusión de Smets (Ss), Dempster-Shafer (DS) y PRC6 se encuentran en la tabla 1 respectivamente. En el caso de Ss, se observa un cálculo de conflicto asociado a las fuentes de información, el cual es de magnitud reducida y no daría lugar a problemas significativos. Para las tres reglas de combinación se el espacio θ_1 es la que tiene una mayor masa de creencia asociada. Los resultados de la normalización DS y PCR6 son casi iguales, excepto que PCR6 aumenta la asignación del espacio θ_1 mientras que DS a $\theta_1 \cup \theta_2$.

Tabla 1. Ejemplo de fusión de datos caso 1.

Espacio	*S1*	*S2*	*Ss*	*DS*	*PCR6*
θ_1	0,55	0,15	0,50	0,57	0,58
θ_2	0,25	0,15	0,24	0,28	0,28
$\theta_1 \cup \theta_2$	0,2	0,7	0,14	0,15	0,14
ϕ	/	/	0,12	/	/

Caso 2: Considerando dos fuentes de información (S1, S2) con un marco de discernimiento limitado a $\Theta = \{A, B, C\}$. El conjunto de potencia se expresa de la siguiente manera: $2^\Theta = \{\emptyset, A, B, C, A \cup B, A \cup C, B \cup C, A \cup B \cup C\}$. Cada fuente de información (S1 y S2) evalúa el grado de creencia para cada uno de los espacios, estos valores se encuentran en la tabla 2, específicamente en la columna S1 y S2 respectivamente.

La fuente de información S1 tiene un mayor grado de creencia para el espacio $\theta_1 (m_1(\theta_1) = 0.99)$, con masa nula para θ_2. En el caso de la fuente de información S2 posee un mayor grado de creencia para el espacio $\theta_2 (m_2(\theta_2) = 0.99)$, con masa nula para θ_1. Finalmente, para ambas fuentes de información le otorgan un grado de creencia muy bajo para el espacio θ_3 ($m_1(\theta_3) = m_2(\theta_3) = 0.01$).

Los resultados de la fusión de Smets (Ss), Dempster-Shafer (DS) y PRC6 se encuentran en la tabla 2 respectivamente. En el caso de Ss, se manifiesta un alto grado de conflicto entre ambas fuentes de información, otorgando masas nulas a θ_1 y θ_2. Los resultados de DS no generan un correcto proceso de normalización atribuyendo una confianza total al espacio θ_3, aunque para ambas fuentes de información la confianza asociada era de 0.01. En este ejemplo en específico genera el interés de utilizar reglas para la gestión de conflicto. Los resultados del PCR6 presentan resultados prometedores atribuyendo valores de masas equivalentes cercanas a 0.5 para los espacios θ_1 y θ_2, resultados más acorde a la realidad de los parámetros de entrada.

Tabla 2. Ejemplo de fusión de datos caso 2.

Espacio	*S1*	*S2*	*Ss*	*DS*	*PCR6*
θ_1	0,99	0,00	0,0000	0,00	0,49985
θ_2	0,00	0,99	0,0000	0,00	0,49985
θ_3	0,01	0,01	0,0001	1,00	0,00030
ϕ	/	/	1,0000	/	/

4 APLICACIÓN DE LA FUSIÓN DE DATOS

El caso de aplicación tiene lugar en una vía férrea de 43 km de longitud, la cual se ha auscultado completamente mediante GPR y con 112 sondeos Pandoscope®.

Para validar los resultados, se utilizará principalmente la técnica de validación de retención (holdout validation), dado que la cantidad de datos disponible es cercana al mínimo requerido para aplicar la validación cruzada. Esta metodología evalúa el desempeño de los métodos de cálculo mediante la división del conjunto de datos en dos partes: el primer conjunto se utiliza para crear el modelo de fusión de datos, mientras que el segundo se reserva exclusivamente para validar dicho modelo. En este caso específico, el 80% de los datos se destinan a la creación del modelo, dejando un 20% para la fase de validación.

En la figura 10, se presentan los modelos generados mediante GPR y la interpolación lineal de Pandoscope® (con el 80% de los datos). En el caso del GPR, se logran identificar las capas de balasto, sub-balasto y la plataforma. Sin embargo, se observa una zona de ignorancia asociada a la interfaz entre el sub-balasto y la plataforma, la cual no pudo ser definida debido a condiciones adversas en el terreno, como altos niveles de ensuciamiento y humedad. Estas condiciones impiden la penetración adecuada de las ondas electromagnéticas, generando así un espacio de

incertidumbre. En contraste, el modelo obtenido mediante la interpolación lineal logra identificar distintas capas asociadas a una vía convencional.

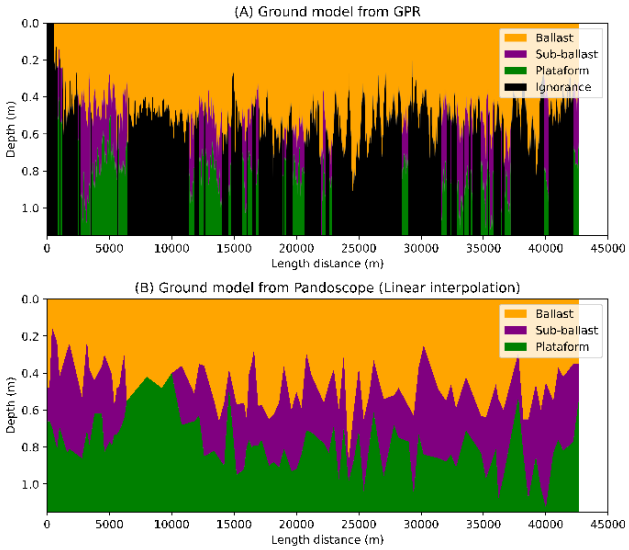

Figura 10. Modelos del terreno propuestos por GPR e interpolación lineal de Pandoscope®.

Los dos modelos del terreno anteriormente definidos serán las fuentes de información que se deben fusionar. En este contexto el marco de discernimiento queda expresado de la siguiente manera:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}.$$

Mientras que el conjunto de potencia:

$$2^{\Theta} = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3\}$$

Antes de fusionar los modelos del terreno, es crucial descomponer el modelo propuesto en distintos espacios, según el conjunto de ponencia establecido (2^{Θ}). Esta descomposición se llevará a cabo conforme a las reglas definidas anteriormente en la asignación de creencias básicas. En la figura 11, se presenta la descomposición del modelo propuesto por el GPR (figura 10a). En este proceso, se asigna la masa de creencia a todos los espacios del conjunto de potencia, excepto $\theta_1 \cup \theta_3$, ya que se considera imposible que esta combinación exista en la subestructura de la vía férrea. En la figura 11a se encuentra la masa asociada a la capa de balasto en donde la parte superior al primer limite identificado por el GPR se encuentra una mayor atribución a la creencia y bajo este límite los valores son nulos. En la figura 11b, se presenta la asignación de creencia a la capa de subbalasto, mostrando áreas en donde la creencia es nula debido a la incertidumbre inherente al modelo propuesto por el GPR. La figura 11c ilustra la asignación de creencia a la plataforma, con altos niveles de creencia bajo el segundo límite identificado. Las figuras 11d y 11e representan espacios de ignorancia parcial, donde la creencia se asocia a la combinación de dos espacios principales. Finalmente, en la figura 11f, se observa la asignación de creencia a la ignorancia total. En áreas donde el modelo GPR estableció ignorancia total, se presenta la mayor asignación de masa, pero cuando se identificó el segundo límite, la masa asociada es nula.

En la Figura 12, se presentan los modelos del terreno derivados de la fusión de datos, aplicando las distintas reglas de combinación descritas en este artículo. Cada modelo del terreno propuesto se acompaña de su correspondiente asignación de masa de creencia. En la Figura 12a, se muestra el modelo derivado de las reglas de combinación de Smets. En contraste con los demás modelos del terreno propuestos, se distinguen claramente las áreas de conflicto marcadas en negro, indicando que la clasificación entre las diversas fuentes de información se encuentra en contradicción. En las Figuras 12c y 12e se presentan los modelos generados mediante las reglas de combinación de Dempster-Shafer y PCR6, respectivamente. La estimación entre ambos modelos es similar, identificando en total 5 espacios en el conjunto de ponencia establecido (2^{Θ}). Sin embargo, se observan ciertas variabilidades en los límites de los modelos para la identificación de los espesores de las diversas capas. Por último, se debe señalar la presencia de zonas con bajos niveles de certidumbre asociados al límite entre el subbalasto y la plataforma (ver figura 12b, 12d y 12f). Esto se debe a que el GPR no puede proporcionar información en estas zonas sobre el límite, y la interpolación lineal del Pandoscope® presenta niveles elevados de incertidumbre. Por esta razón, se observan valores bajos de certidumbre para el segundo límite.

Aunque los modelos propuestos presentan variaciones en términos de clasificación según el conjunto de ponencia establecido (2^{Θ}), las diferencias son más evidentes en la gestión de la masa de creencia asignada a cada modelo. La Figura 13 ilustra la distribución de la masa de creencia asociada a los diversos modelos, restringida al intervalo de longitud de 30000 a 31500 metros. Además, en esta representación se incluyen los límites obtenidos mediante GPR (línea continua) y Pandoscope® (línea segmentada). La elección de esta zona se justifica por el alto grado de conflicto entre las fuentes de información y la falta de identificación de la interfaz 2 por parte del GPR. En la figura 13, la zona de conflicto se encuentra entre los límites establecidos por las diferentes fuentes de información (línea continua y punteada). Esta área específica, marcada en negro en la figura 12a, indica que el conflicto tiene una atribución de masa más elevada. En la figura 13b, la masa de creencia asociada al modelo de Dempster-Shafer experimenta un aumento considerable, ya que la normalización de la masa de creencia es proporcional al nivel de conflicto de este método. En la figura 13c, se observa un aumento en la masa de creencia asociada al PCR6, aunque no tan pronunciado como en el caso anterior. Esta representación facilita la identificación de la gestión de la masa por parte de cada regla de combinación. Finalmente, la línea punteada de color gris representa el límite 2 de la interpolación lineal del Pandoscope®. Dado que el GPR no proporciona información significativa en esta área, los niveles de certidumbre son más bajos bajo esta línea y aumentan en profundidad.

En la Figura 14, se compara la estimación de los métodos de fusión con el 20% de las mediciones obtenidas mediante Pandoscope® para validar los resultados. La estimación de la interfaz 1 muestra una buena tendencia, con niveles de dispersión bajos y, en la mayoría de los casos, dentro del límite tolerable marcado por líneas punteadas. Todos los métodos exhibieron un comportamiento similar, aunque con variabilidades. Asimismo, se observa una tendencia evidente en los resultados de la fusión de datos para la segunda interfaz. Aunque, en comparación con la primera interfaz, existe una mayor dispersión debido principalmente a la ausencia constante de la fuente de información del GPR.

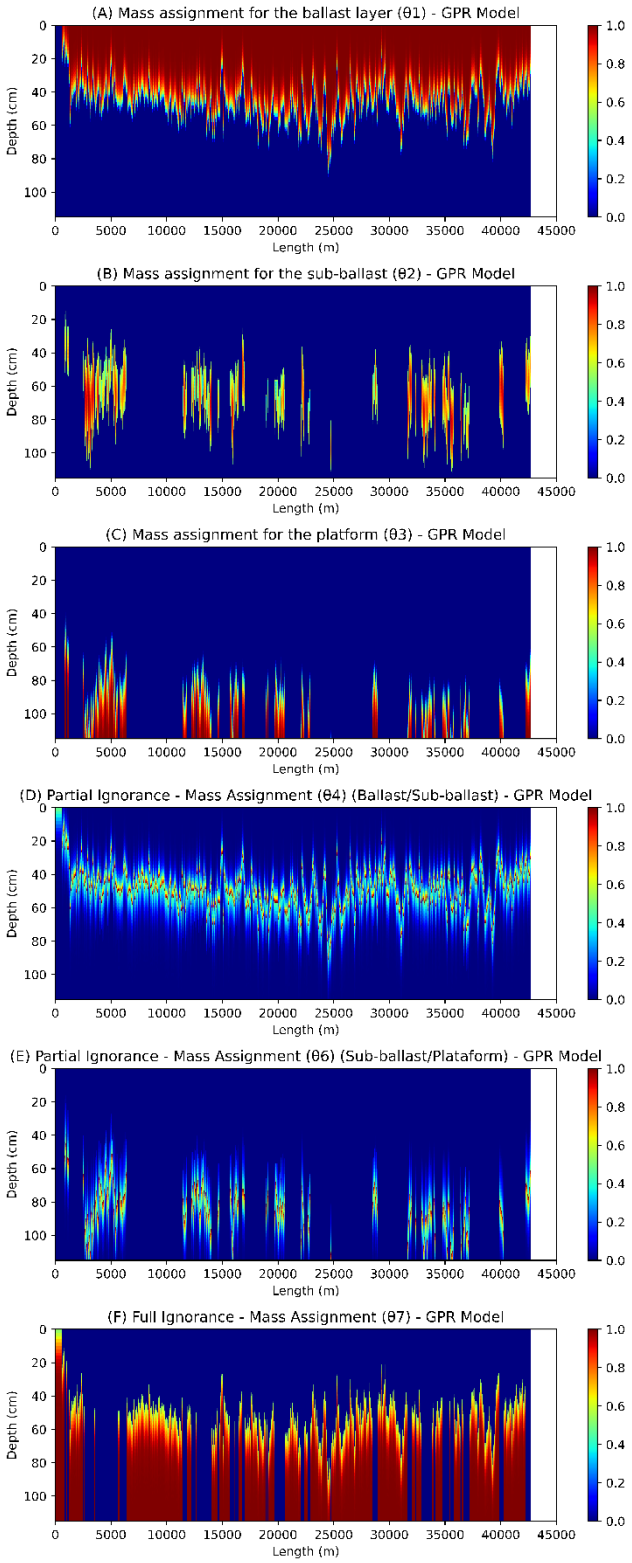
(A) Mass assignment for the ballast layer (θ1) - GPR Model
(B) Mass assignment for the sub-ballast (θ2) - GPR Model
(C) Mass assignment for the platform (θ3) - GPR Model
(D) Partial Ignorance - Mass Assignment (θ4) (Ballast/Sub-ballast) - GPR Model
(E) Partial Ignorance - Mass Assignment (θ6) (Sub-ballast/Plataform) - GPR Model
(F) Full Ignorance - Mass Assignment (θ7) - GPR Model
Depth (cm)
Length (m)

Figura 11. Asignación de la masa de creencia para los diferentes espacios de $2^{\theta}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 \; y \; \theta_7)$.

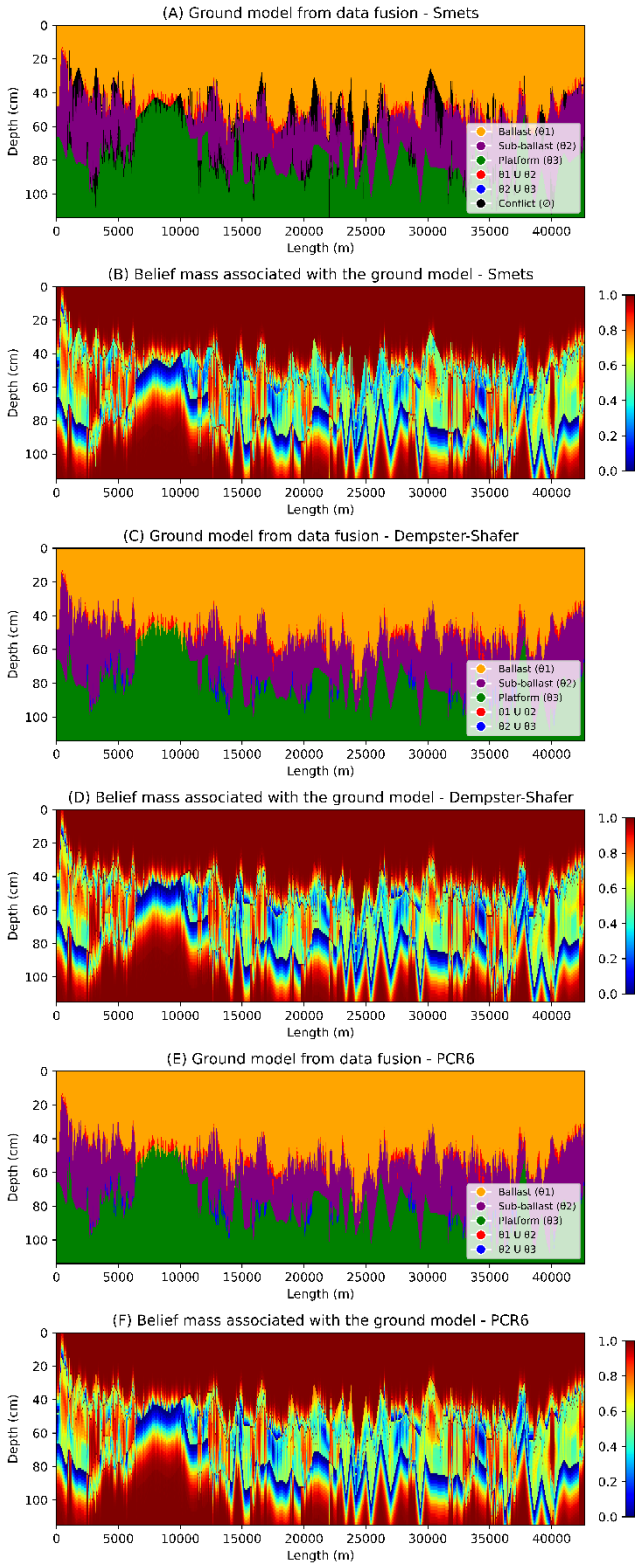
(A) Ground model from data fusion - Smets
(B) Belief mass associated with the ground model - Smets
(C) Ground model from data fusion - Dempster-Shafer
(D) Belief mass associated with the ground model - Dempster-Shafer
(E) Ground model from data fusion - PCR6
(F) Belief mass associated with the ground model - PCR6
Ballast (θ1)
Sub-ballast (θ2)
Platform (θ3)
θ1 U θ2
θ2 U θ3
Conflict (∅)
Depth (cm)
Length (m)

Figura 12. Resultados los modelos de terreno y la masa de creencia asociada al modelo para diferentes reglas de combinación.

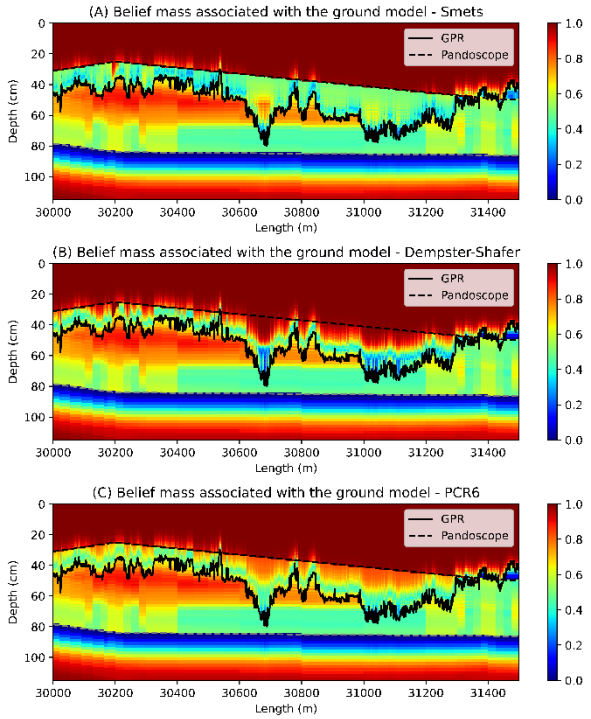
(A) Belief mass associated with the ground model - Smets
(B) Belief mass associated with the ground model - Dempster-Shafer
(C) Belief mass associated with the ground model - PCR6
GPR
Pandoscope
Depth (cm)
Length (m)

Figura 13. Masa de creencias para las distintas reglas de combinación.

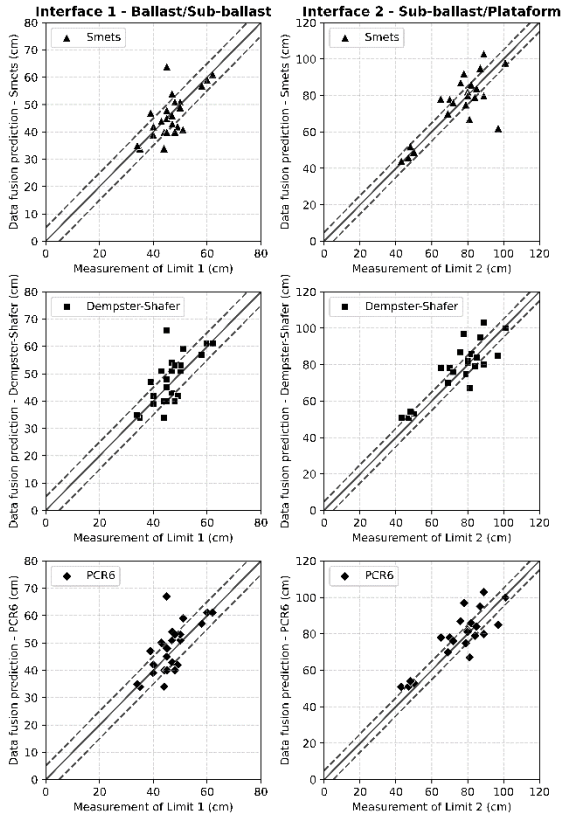

Figura 14. Validación de métodos de fusión de datos.

5 DIAGNOSTICO GEOTECNICO

El diagnóstico geotécnico tiene como objetivo evaluar el estado de las diversas capas y determinar su idoneidad para garantizar operaciones seguras. Para lograr este objetivo, se debe determinar la composición de los suelos y evaluar su resistencia mecánica. En este sentido, la primera tarea es identificar las distintas capas en términos de material y cuantificar su espesor. Dependiendo del tipo de vía, los espesores necesarios varían; en este caso, se requieren un total de 45 cm para la capa de balasto y 20 cm para el subbalasto. La Figura 15 presenta los trazados de los espesores de la capa de balasto y subbalasto, calculados mediante valores promedio cada 200, obtenidos a partir de la medición del GPR y de todas las reglas de combinación utilizadas.

Se observa que desde el punto 0 hasta los 18.000 m existe una clara tendencia similar en el espesor de la capa de balasto propuesto por la medición GPR y los resultados de la fusión de datos. Sin embargo, más allá de los 18.000 m se puede notar una mayor variabilidad en los resultados obtenidos de la fusión de datos y la medición GPR. En relación al subbalasto, es importante señalar que el GPR no logró identificar la totalidad de la capa, a diferencia de los resultados obtenidos mediante la fusión de datos. En la mayoría del trazado, las capas cumplen con los espesores mínimos requeridos; no obstante, hay áreas específicas que requerirán ajustes.

Figura 15. Indicadores de espesores de la capa balasto y subbalasto.

Para la capa de balasto, es necesario realizar un análisis granulométrico, ya que esto posibilitará la evaluación del estado de la capa. Es necesario determinar si la granulometría está degradada, ya que esto puede afectar su capacidad para cumplir con sus funciones operacionales de manera óptima.

En cuanto al subbalasto y la plataforma, se evalúa la importancia de estas capas mediante el CBR in situ (ver Figura 16). Es relevante destacar que en la mayoría de los casos se obtiene una capacidad portante excelente, en conformidad con las normativas específicas para cada una de las capas. Sin embargo, persisten áreas con capacidades deficientes que requerirán mantenimiento.

En última instancia, la capa de balasto requerirá renovación

debido a un significativo deterioro de sus partículas. Además, se llevaron a cabo análisis complementarios de las capas de balasto y subbalasto, considerando su espesor y relevancia, de acuerdo con las pautas establecidas por la normativa francesa de rehabilitación de vías férreas (SNCF, 2021). Esta evaluación facilita la identificación y reducción de las áreas que necesitan ser sometidas a labores de mantenimiento.

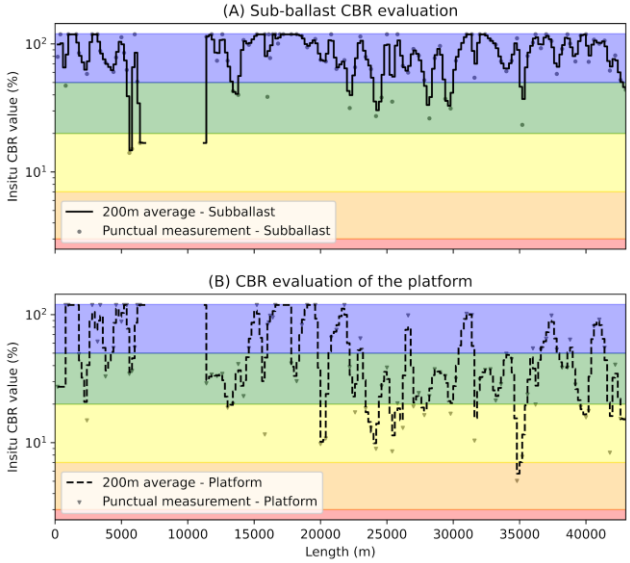
(A) Sub-ballast CBR evaluation
Insitu CBR value (%)
200m average - Subballast
Punctual measurement - Subballast
(B) CBR evaluation of the platform
Insitu CBR value (%)
200m average - Platform
Punctual measurement - Platform
Length (m)

Figura 15. Indicadores de espesores de la capa balasto y subbalasto.

6 CONCLUSIONES

La fusión de datos a través del método de "La masa de creencia" emerge como una estrategia efectiva para mejorar la confiabilidad del modelo de capas geotécnicas en la subestructura ferroviaria, al integrar información proveniente de múltiples fuentes. Las fuentes de información presentan modelos con un nivel de correlación significativo, indicando que hay pocas zonas de conflicto (ver figura 12a). Esto sugiere que los métodos producirán resultados similares en gran medida (ver el limite 1 de la figura 14). No obstante, en situaciones donde hay conflictos más pronunciados, la disparidad entre los resultados de diferentes reglas de combinación se acentúa considerablemente (ver el limite 2 de la figura 14).

Por otra parte, la validación de los resultados de la fusión de datos implicó la exclusión del 20% de los sondeos Pandoscope®, dado que estos proporcionan mediciones más representativas de la vía férrea. Se identificó una tendencia lineal en todas las reglas de combinación, con una dispersión baja para la interfaz 1 (balasto/subbalasto) y una dispersión más elevada para la interfaz 2 (subbalasto/Plataforma). Esto debido que el GPR debido a las condiciones de humedad del terreno no es capaz de identificar la segunda interface (zonas de color negro de la figura 10a).

La fusión de datos no solo contribuyó a incrementar la fiabilidad de los resultados, sino que también proporcionó información adicional para la interfaz 2. Este enfoque brinda datos más precisos que mejoran el diagnóstico geotécnico, facilitando la toma de decisiones al proporcionar variables clave para determinar el estado de la capa, como espesores de capas, ensuciamiento del balasto y capacidad portante de las capas.

7 REFERENCIAS

Artagan SS, Bianchini Ciampoli L, D'Amico F, Calvi A, Tosti F. Non-destructive Assessment and Health Monitoring of Railway Infrastructures. vol. 41. Springer Netherlands; 2020. https://doi.org/10.1007/s10712-019-09544-w.

Borkovcová A, Borecký V, Artagan SS, Ševčík F. Quantification of the mechanized ballast cleaning process efficiency using GPR technology. Remote Sens 2021;13. https://doi.org/10.3390/rs13081510.

Brough MJ, Ghataora GS, Stirling AB, Madelin KB, Rogers CDF, Chapman DN. Investigation of railway track subgrade. I: In-situ assessment. Proc Inst Civ Eng Transp 2003;156:145–54. https://doi.org/10.1680/tran.2003.156.3.145.

Dezert Théo, Lopes SP, Fargier Y, Fortelle QF De, Tourment R, Dezert Théo, et al. Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues. Digues Marit Fluviales Prot Contre Les Inondations 2019. https://doi.org/10.5281/zenodo.2530727.

Gourvès R, Barjot R. Le pénétromètre dynamique léger PANDA, The PANDA ultralight dynamic penetrometer 1992.

Li D, Hyslip J, Sussmann T, Chrismer S. Railway Geotechnics. vol. 1. CRC Press - Taylir & Francis Group; 2016.

Martin A. La fusion d'informations - Polycopié de cours ENSIETA - Réf. : 1484. 2005.

Rojas Vivanco J, Barbier S, Benz Navarrete MA, Breul P. Statistical Analysis of the Influence of Ballast Fouling on Penetrometer and Geoendoscope Data. Adv Transp Geotech IV 2021;165:915–30. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5_75.

Rojas Vivanco J, Breul P, Talon A, Benz-navarrete A, Barbier S, Ranvier F. On site fouling index assessment of ballasted layers using cone dynamic penetrometer and miniature borescope image analysis. Transp Geotech J 2024;45:1–14. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101213.

Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence turns 40. Int J Approx Reason 2016;79:7–25. https://doi.org/10.1016/j.ijar.2016.07.009.

Smarandache F, Dezert J. Probabilistic PCR6 fusion rule. Adv Appl DSmT Inf Fusion 2016;III.

SNCF. IG05016 - Guide de réhabilitation des plateformes ferroviaires anciennes des lignes exploitées à V≤ 220 km/h. 2021.

Viswanathan R. Data Fusion. Comput Vis 2020:1–3. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_298-1.

Wang S, Liu G, Jing G, Feng Q, Liu H, Guo Y. State-of-the-Art Review of Ground Penetrating Radar (GPR) Applications for Railway Ballast Inspection. Sensors 2022;22:2450. https://doi.org/10.3390/s22072450.

Basye C, Wilk S, Gao Y. Ground Penetrating Radar (GPR) Technology Evaluation and Implementation. 2020.

Dezert T, Picault C, Daumas B, Magnin O, Vergniault C, Courivaud J-R. Caractérisation des fuites et de la lithologie des digues de canaux par méthodes géophysiques et fusion de données. Vingt Septième Congrès Des Grandes Barrages Marseille, Juin 2022 2022. https://doi.org/10.1201/9781003211808-110.

Liu Z, Deveci M, Pamučar D, Pedrycz W. An effective multi-source data fusion approach based on α-divergence in belief functions theory with applications to air target recognition and fault diagnosis. Information Fusion 2024;110:102458. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102458.

View publication stats